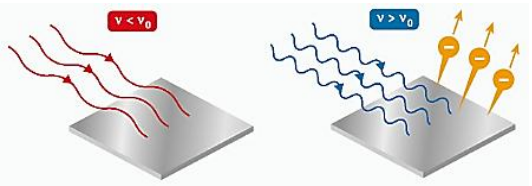
But de l'activité : Découvrir l'effet photoélectrique.

La compréhension de la nature particulaire de la lumière par l'effet photoélectrique a permis le développement et l'essor de nouvelles technologies, telles les panneaux photovoltaïques, diode électroluminescentes ou les capteurs CCD des appareils photo numériques. Dans cette activité, nous allons découvrir cette interaction lumière-matière.

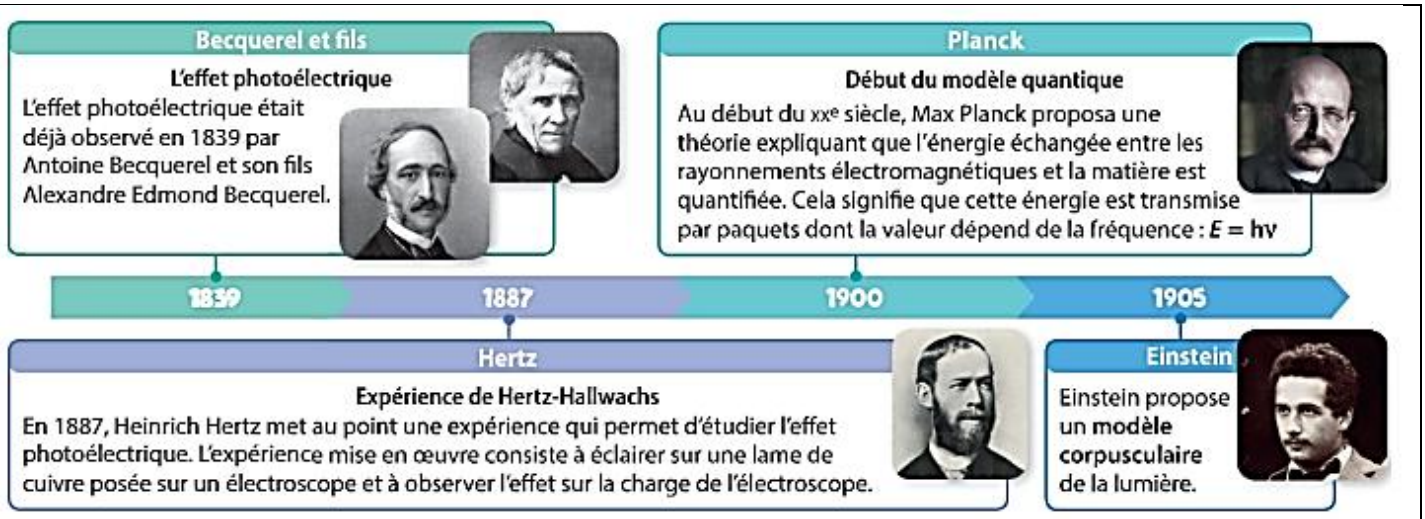
Partie I : Introduction à l'effet photoélectrique

Document 1 : L'effet photoélectrique

Lorsqu'un métal est exposé à une lumière du domaine ultraviolet ou visible, des électrons peuvent être éjectés du métal grâce à l'énergie lumineuse reçue. Cet effet ne dépend pas de la puissance du faisceau lumineux. Il se produit dès que le métal est éclairé (pas de délai) à condition que la fréquence ν du rayonnement soit supérieure à une fréquence seuil ν_0 caractéristique du métal. Si $\nu < \nu_0$, aucun électron n'est éjecté de la surface du métal, même pour un faisceau lumineux de forte puissance ou pour une durée d'éclairement élevée.



Document 2 : Repères chronologiques



Note : Un électroscope est un appareil permettant de mettre en évidence qu'un objet est chargé électriquement.

Document 3 : L'hypothèse d'Einstein

En 1905, Albert Einstein postule que toute onde électromagnétique de fréquence ν est en réalité un flux de quanta d'énergie (notion de photon), chaque « paquet » ayant une énergie $\mathcal{E} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$.

L'intensité d'un faisceau monochromatique dépend du nombre de photons : un faisceau est d'autant plus intense qu'il comporte un grand nombre de photons.

Lorsqu'un photon entre en collision avec un électron présent dans un métal, il lui transfert toute son énergie. Si cette énergie est suffisante, alors l'électron est arraché. L'énergie minimale pour arracher un électron est appelé travail d'extraction W_e. Si l'énergie du photon est supérieur au travail d'extraction, alors le surplus d'énergie fourni est converti en énergie cinétique $\mathcal{E}_c$.

1. Donner une ou plusieurs propriétés de la lumière justifiant la théorie ondulatoire.

2. Expliquer pourquoi l'effet photoélectrique remet en question le modèle ondulatoire.

3. A quoi correspond la fréquence seuil ν_0 ? En déduire la relation entre ν_0 et le travail d'extraction W_e du métal.

4. A partir des documents, donner l'expression de la vitesse v_0 d'un électron extrait du métal en fonction de la fréquence ν du rayonnement et du travail d'extraction W_e du métal.

Partie II : Applications

Données :

- *Masse de l'électron : me = 9,11.10^{-31} kg*
- *Constante de Planck : h = 6,63.10^{-34} J.s*
- *Charge élémentaire : e = 1,60.10^{-19} C*
- *Célérité de la lumière dans le vide : c = 3.10^{8} m.s^{-1}*
- *Intensité de la pesanteur : g = 9,81 N.kg^{-1}*
- *Force électrique : $\vec{F_e} = q\vec{E}$*
- *Champ électrique dans un condensateur : $E = \frac{|U|}{d}$, orienté de la cathode à l'anode.*

Expérience de Millikan

Rappel : Travail d'une force

Le travail d'une force constante caractérise en fait l'effet d'une force lors du déplacement de l'objet considéré.

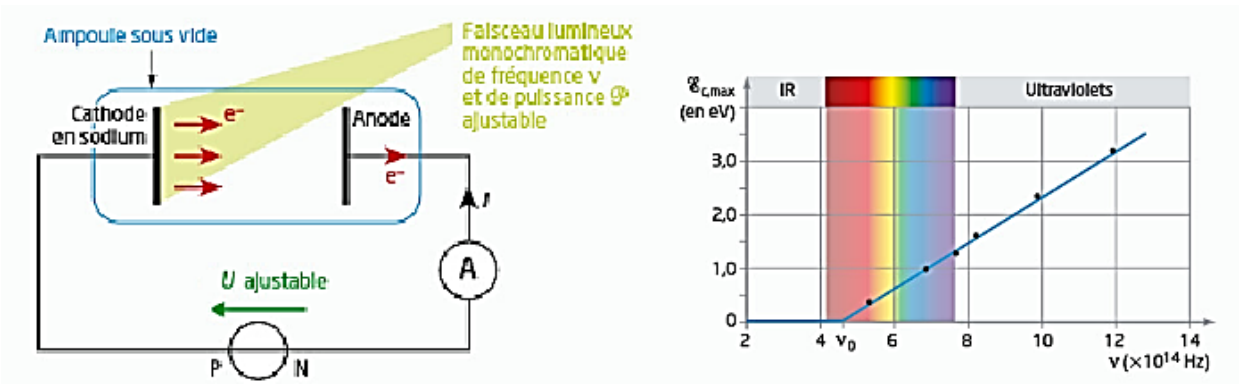
L'expression mathématique du travail d'une force $\vec{F}$ lors du déplacement d'un objet d'un point A à un point B est donnée par le produit scalaire entre les deux vecteurs : $W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F}\cdot\overrightarrow{AB} = F \times AB \times \cos(\vec{F};\overrightarrow{AB})$

où F est la valeur de la force, AB la valeur de la distance entre les points A et B et $(\vec{F};\overrightarrow{AB})$ l'angle orienté entre la force $\vec{F}$ et le déplacement $\overrightarrow{AB}$. Le travail a pour unité le joule (J).

Le théorème de l'énergie cinétique relie énergie et travail des forces : $\Delta E_c = \sum W_{AB}(\vec{F})$

Document 4 : L'expérience de Millikan

Pour déterminer les caractéristiques photoélectriques du sodium, Millikan propose l'expérience suivante :
Une photocathode en sodium et une anode sont placées dans un tube à vide. L'ensemble cathode-anode est équivalent à un condensateur plan générant un champ électrique E. La photocathode est alors éclairée par un rayonnement électromagnétique. Des électrons sont alors émis dans toutes les directions avec une vitesse v_0, puis attirés vers l'anode. La mesure de l'intensité I du courant électrique permet alors d'estimer le nombre d'électrons émis par la cathode lorsqu'elle est éclairée. L'énergie cinétique maximale $\mathcal{E}_{c,max}$ des électrons est déterminée en mesurant la tension d'arrêt U_0 au-delà de laquelle aucun courant électrique ne passe, car les électrons sont ralentis entre les armatures et arrivent avec une vitesse nulle à l'anode.



Note : Une simulation de l'expérience est disponible sur
https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric&locale=fr

On considère ici l'expérience de Millikan où la distance entre les armatures (cathode et anode) est d = 10 cm. La photocathode est éclairée par un rayonnement de longueur d'onde λ=430 nm. En faisant varier la tension, on mesure la tension d'arrêt pour U_0 = 0,49 V.

On étudie uniquement le cas des électrons émis dans la direction du champ électrique $\vec{E}$. On néglige ici le poids de l'électron devant la force électrique.

5. Sur un schéma, représenter le tube à vide avec l'anode et la photocathode, le vecteur vitesse $\vec{v}$ d'un électron se trouvant entre les armatures, le champ électrique $\vec{E}$ et la force électrique $\vec{F_e}$.

6. Exprimer le travail de la force électrique entre les armatures dans le cas du dispositif mis à la tension d'arrêt. En déduire que la relation entre l'énergie cinétique $\mathcal{E}_c$ d'un électron extrait de la photocathode et la tension d'arrêt U_0 est : $\mathcal{E}_c = e\,U_0$.

7. Calculer l'énergie des photons incidents et en déduire la valeur du travail d'extraction W_e du sodium.

8. En déduire la valeur de la fréquence seuil ν_0 du sodium et la longueur d'onde λ_0 associée.

Panneaux photovoltaïque

Rappels : Energie et puissance électrique

La puissance d'un dipôle est définie comme le produit de la tension à ses bornes et de l'intensité du courant qui le traverse. Elle s'exprime en watt (W).

$$P = U \times I$$

L'énergie consommée ou produite est liée à la durée de fonctionnement et à la puissance du convertisseur. Elle s'exprime en joule (J).

$$E = P \times \Delta t$$

Le rendement d'un convertisseur est une grandeur sans unité qui mesure l'efficacité de sa conversion.

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{reçue}}$$

Document 5 : Flux de rayonnement surfaciques et flux de rayonnement

Le flux de rayonnement surfacique φ (aussi nommé irradiance) correspond au flux par unité de surface, c'est-à-dire à la puissance reçu par unité de surface éclairée. Il s'exprime en $W.m^{-2}$.

$$\varphi = \frac{P_{reçue}}{S_{éclairée}}$$

On souhaite installer, sur le toit d'une maison, des panneaux photovoltaïques de dimensions 1520 mm × 1475 mm dont les caractéristiques intensité-tension sont données ci-contre.

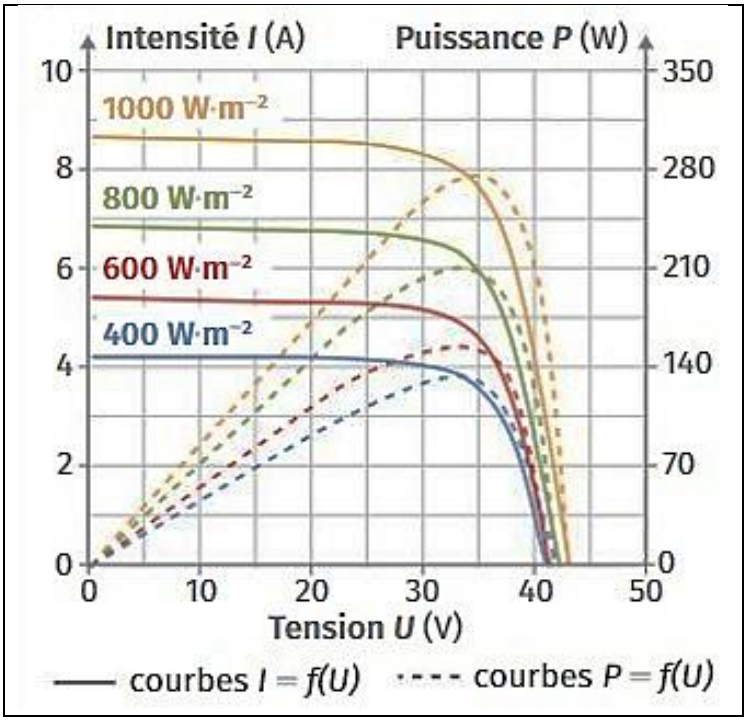
On se propose de déterminer le rendement de ces panneaux pour un flux lumineux surfacique de 1000 $W.m^{-2}$.

9. Quelle est l'influence de la puissance lumineuse sur l'intensité électrique mesurée dans le circuit ? Justifier.

10. Déterminer la puissance maximale P_{max} délivrée par le panneau, puis en déduire la tension U_{max} et l'intensité I_{max} correspondants.

11. Calculer le rendement du panneau photovoltaïque.

Document 6 : Caractéristique du panneau photovoltaïque pour différent flux de rayonnement surfaciques



Ce qu'il faut retenir

❖ L'effet photoélectrique

Lorsqu'un photon entre en collision avec un électron présent dans un métal, il lui transmet son énergie et disparait. Si cette énergie est suffisamment grande, l'électron est éjecté du cortège électronique de l'atome. L'énergie minimale nécessaire pour éjecter un électron situé à la surface du métal est appelée travail d'extraction W_e.

Si l'énergie du photon est strictement supérieure au travail d'extraction, le surplus d'énergie fourni est converti sous forme d'énergie cinétique $\mathcal{E}_c$ acquise par l'électron.

La fréquence seuil ν_0 est alors la fréquence minimale du rayonnement incident permettant d'extraire un électron. Elle est caractéristique du métal.